

窒素加圧雰囲気下で熱処理されたスギ心材の耐朽性と金属腐食性

愛須 未紀・酒井 温子*¹・佐藤 敬之*²・金沢 吉昭*³

窒素加圧雰囲気下で220℃の温度条件で熱処理されたスギ心材の耐朽性試験と金属腐食性試験を行った。

耐朽性試験では、JIS K 1571に準拠して、オオウズラタケおよびカワラタケによる12週間の抗菌操作を実施したところ、腐朽による質量減少はほとんどなく、熱処理されたスギ心材は高い耐朽性を有していることが明らかになった。

金属腐食性試験では、3種類のくぎを打ち込んだ木材試験体を高温条件および水濡れ条件で一定期間暴露した結果、熱処理材では無処理材と比較して太め鉄丸くぎの腐食量が多くなった。熱処理材のpHは無処理材より1.3低い5.3であり、太め鉄丸くぎの腐食が進行しやすくなった一因として、pHの低下が考えられた。溶融亜鉛めっき太め鉄丸くぎおよびステンレス鋼くぎは、熱処理材、無処理材ともに腐食量がわずかであり、熱処理による腐食への影響は認められなかった。熱処理されたスギ心材は、一般に流通している他の木材と比べて特に酸性が強いわけではないが、接合具や接合金物を使用する際には、鉄単体のものを避け、溶融亜鉛めっき等の防錆処理を施したものやステンレス鋼等の腐食しにくい金属のものを選択することが望ましいと言える。

1. はじめに

わが国では、木材保存剤の防腐性能試験において、供試材料にはスギ辺材を用いると定められている¹⁾。また、化学修飾木材や熱処理木材の耐朽性を試験する際にもスギ辺材が用いられることが多い。これは、スギが日本の主要樹種であり、かつ、その辺材部分の耐朽性が低いため、処理によりこの部位を腐らなくさせることが、その処理の有効性を示すのに適するからである。しかし、実際に建築用材等に利用されるスギ材は、心材部分を多く含んでいる。スギ心材の耐朽性は辺材より優れているものの、一般には中程度と評価されており²⁾、雨水にさらされる場所や高湿度となる場所での長期間の使用には適さない。一方、木材に耐久性を付与する方法の1つである熱処理は、処理した木材が酸性を帯びることが知られており³⁾、金属の腐食を進行させる可能性がある。

そこで、本研究では、スギ心材に対して耐久性を向上させるための220℃の熱処理を行い、得られた材料の耐朽性を確認することにした。また、3種類のくぎを用いて金属腐食性を調べ、熱処理木材に適する接合具や接合金物について考察を行った。

2. 材料と方法

2.1 材料

奈良県産スギ丸太の心材部分から得られた天然乾燥の板材12体を使用した。板材の寸法は、長さが2m、幅が120mmまたは160mm、厚さが33mmとした。

この板材を長さ1mずつに2分割し、片方のみ熱処理を行った。処理は2014年7月に江間忠ウッドベース(株)の蒲郡工場にて、窒素加圧雰囲気下で220℃の温度条件で行った。この方法で処理されたスギ辺材が高い耐朽性を有することは、すでに明らかになっている^{4,5)}。

2.2 耐朽性試験

耐朽性試験は、JIS K 1571:2010「木材保存剤－性能基準及びその試験方法」5.2防腐性能5.2.1室内試験5.2.1.1注入処理用¹⁾に準拠して行った。熱処理スギ心材9体と、それらと繊維方向に連続していた無処理スギ心材9体について、それぞれの板材の中央付近から、木口面が20×20mm、繊維方向が10mmの試験体を2個ずつ採取した。同一板材から採取した2個の試験体は、オオウズラタケとカワラタケにそれぞれ供試した。また、供試菌の活性を確認するために、無処理のスギ辺材試験体を、各供試菌に対して9個ずつ使用した。

熱処理木材は、ウッドデッキやルーバーなど、太陽光

*1 現奈良県農林部奈良の木ブランド課

*2 江間忠ウッドベース株式会社

*3 株式会社江間忠ホールディングス

や雨水に直接さらされる環境で使用されることが多いため³⁾、抗菌操作に先立ち耐候操作を実施した。耐候操作は、流水中に8時間の浸せきと60℃で16時間の乾燥を1サイクルとして、10サイクルを実施した。その後、試験体の60℃恒量を測定した。

次に、抗菌操作として、オオウズラタケおよびカワラタケを培養した培養瓶内に、エチレンオキサイドで滅菌処理をした試験体を3個ずつ設置した。培養瓶は、室温27℃、相対湿度75%の培養室に静置した。12週間経過後、試験体を培養瓶から取り出し、表面に付着した菌糸を取り除き、60℃恒量を測定した。式(1)により質量減少率 L_1 (%)を算出した。

$$L_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

ただし、 m_1 : 抗菌操作前の60℃恒量 (g)、 m_2 : 抗菌操作後の60℃恒量 (g)。

2.3 金属腐食性試験

木材に接する金属の腐食を調べるために、表1に示す3種類のくぎを使用した。また、金属の腐食を促進的に試験するために、くぎを打ち込んだ木材試験体を、温度60℃、相対湿度80%の環境(以下、高温条件と記す。)と、室温で水に濡れた状態(以下、水濡れ条件と記す。)で一定期間暴露させて、くぎに生じる腐食を評価した。

高温条件による促進試験では、長さが1m、幅が120mm、厚さが33mmの熱処理スギ心材3体と、それらと繊維方向に連続していた無処理スギ心材3体を使用した。図1に試験体の採取およびくぎの打ち込み方法を示す。板材を繊維と直角方向に切断し、長さが250mmの試験体を3個ずつ採取した。繊維方向に連続していた熱処理の板材と無処理の板材から得た6個の試験体を1組とした。太め鉄丸くぎ(以下、CNくぎと略す。)はアセトン、溶融亜鉛めっき太め鉄丸くぎ(以下、ZNくぎと略す。)およびステンレス鋼くぎ(以下、SFくぎと略す。)はヘキサンで洗浄した後、乾燥させて質量を測定し、直ちに各試験体の長さ250mmの側面に各10本を頭部まで

打ち込んだ。くぎを打ち込んだ試験体は、図2に示すように、温度60℃、相対湿度80%の恒温恒湿器(PR-4KH、エスペック(株))に入れ、組ごとに3、6および12週間放置した。

所定期間経過後、試験体を割り、くぎを傷つけずに取り出し、JIS K 1571:2010「木材保存剤-性能基準及びその試験方法」5.4鉄腐食性能5.4.1注入処理用¹⁾に準拠した方法(以下、さび除去法Aと記す。)で、さびの除去を行った。このさび除去法Aは、鉄の腐食量を測定するのに適した方法である。手順は以下の通りである。取り出したくぎを10%くえん酸水素二アンモニウム水溶液中で20分間煮沸した後、水洗し薬液を除去した。この時、くぎにさびや木片が残存していた場合は、ステンレス製のヘラを用いて、できる限りそれらを除去した。その後、直ちに40℃の送風乾燥器内で乾燥させ、10分程度室内に放置してから質量を測定した。また、さび除去法Aの操作によるくぎの質量減少の影響を調べるため、暴露試験に供していない未使用のくぎ各10本に対しても、さび除去法Aの操作を実施した。

水濡れ条件による促進試験では、長さが1m、幅が160mm、厚さが33mmの熱処理スギ心材3体と、それらと繊維方向に連続していた無処理スギ心材3体を使用した。試験体の採取およびくぎの打ち込みについては、試験体の長さを200mmとしたこと以外は、高温条件の場

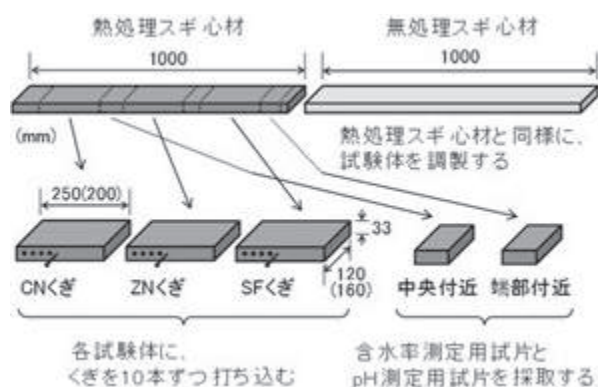


図1 金属腐食性試験の試験体の調製

表1 金属腐食性試験に使用したくぎ

種類	略称	長さ(mm)	胴部径(mm)	材質	めっき
太め鉄丸くぎ	CNくぎ	63.5	3.33	鉄	なし
溶融亜鉛めっき太め鉄丸くぎ	ZNくぎ	63.5	3.33	鉄	亜鉛
ステンレス鋼くぎ	SFくぎ	65	3.05	ステンレス鋼(SUS304)	なし

合と同様に行った。くぎを打ち込んだ試験体は、図2に示すように、底に脱イオン水を張った蓋付きプラスチック容器に木口面を下にして入れ、試験体の下部約50mmを水中に浸せきさせた。試験体に打ち込まれたくぎは、水面から約40~130mm上部に位置していた。プラスチック容器は室内に設置し、暴露期間は組ごとに12、24および26週間とした。この間の容器内の温湿度を温湿度データロガー (RTR-53A、(株) ティアンドデイ) により1時間ごとに測定した結果、湿度は期間を通して概ね99%であった。期間中の平均温度は17℃で、暴露を開始した9月の月平均温度が24℃と最も高く、1月の月平均温度が12℃で最も低かった。

12および24週間暴露した試験体は、割ってくぎを傷つけずに取り出し、さび除去法Aによりさびを除去した後、くぎの質量を測定した。26週間暴露した試験体は、割ってくぎを傷つけずに取り出し、JIS H 8502:1999「めっきの耐食性試験方法」11.めっきの耐食性の判定方法11.7質量減少による方法⁶⁾に準拠した方法(以下、さび除去法Bと記す)で、さびの除去を行った。このさび除去法Bは、鉄が素地金属で亜鉛のめっきが施されたものに対して、めっきの腐食量を測定するための方法である。手順は以下の通りである。取り出したくぎを70℃の10%酢酸アンモニウム水溶液に3分間浸せきした後、水洗し薬液を除去した。この時、くぎにさびや木片が残存していた場合は、ステンレス製のヘラを用いて、できる限りそれらを除去した。その後、直ちに40℃の送風乾燥器内で乾燥させ、10分程度室内に放置してから質量を測定した。また、さび除去法Bの操作によるくぎの質量減少の影響を調べるため、暴露試験に供していない未使用のくぎ各5本に対しても、さび除去法Bの操作を実施した。

暴露前のくぎの質量と、高温および水濡れ条件で暴露し、さびを除去した後のくぎの質量から、式(2)によりくぎの質量減少率 L_2 (%)を算出し、腐食性を評価した。

$$L_2 = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100 \quad (2)$$

ただし、 m_3 : 暴露前のくぎの質量 (g)、 m_4 : 暴露後のくぎの質量 (g)。

試験体を採取した熱処理の板材および無処理の板材のうち、水濡れ条件で26週間暴露した試験体を採取した板材を除いた各5体について、図1に示すように、それぞれの中央付近および片方の端部から10~80mm内側(以下、端部付近と記す)で、繊維方向に20mmの試片を1個ずつ採取した。採取した2個の試片は全乾法により含水率を求め、その平均値を、各試験体の暴露前における推定含水率とした。また、高温条件での暴露試験に使用した試験体については、暴露前の質量と推定含水率から全乾質量を推定し、この推定した全乾質量と暴露終了時の質量から、暴露終了時における推定含水率を算出した。水濡れ条件の暴露終了時の試験体は、くぎが打ち込まれている水面より上部の部分と水中に漬かっている部分で含水率が異なると考えられることから、24および26週間暴露した試験体について、くぎを取り出した後、直ちにくぎが打ち込まれていた部分の木材を切り出し、全乾法によりその含水率を求めた。

また、試験体を採取した熱処理の板材および無処理の板材各6体について、pHの測定を、既往の報告⁷⁾を参考にした方法で行った。図1に示すように、それぞれの板材の中央付近および片方の端部付近で、繊維方向に10mmの試片を1個ずつ採取し、ワイレー式粉砕器で直径2mmの孔を通る木粉に調製した。この木粉3gをビーカーに量り取り、30mlの脱イオン水を加え、軽く攪拌した。10分間放置後、pH測定器 (B-711、(株) 堀場製作所) を用いてpHを測定した。

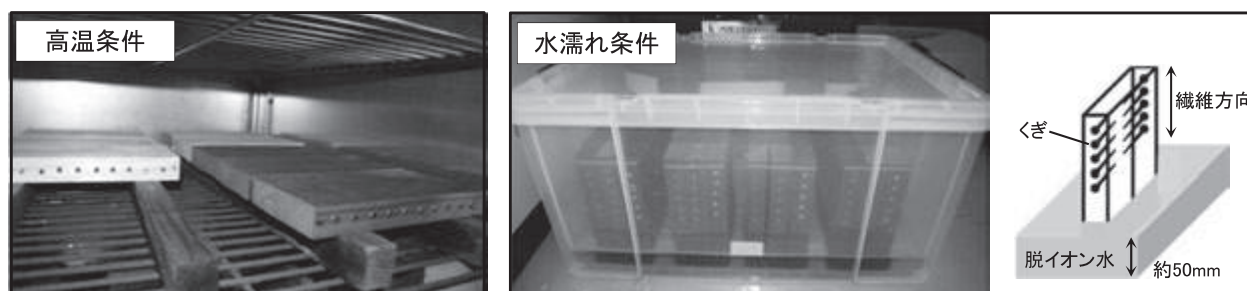


図2 金属腐食性試験の暴露の様子

3. 結果と考察

3.1 耐朽性

図3に抗菌操作終了時の試験体を示す。無処理のスギ辺材およびスギ心材は、オオウズラタケおよびカワラタケの菌糸によって、試験体全面が厚く覆われていた。一方、熱処理したスギ心材は、オオウズラタケおよびカワラタケの菌糸による被覆は見られたが、菌糸の被覆量は少なかった。

図4に抗菌操作後の試験体を、また図5に質量減少率を示す。無処理のスギ辺材試験体のオオウズラタケおよびカワラタケによる平均質量減少率はそれぞれ56%および39%であり、両菌とも活性が高く、JIS K 1571の基準¹⁾を満たしていた。無処理のスギ心材ではそれぞれ53%と34%であり、辺材に比べると数値はやや低くなった。両者とも大きく変形するとともに細かな亀裂が多数生じており、顕著な腐朽形態が確認された。一方、熱処理のスギ心材試験体ではそれぞれ0%および1%で、目視でも腐朽した様子は確認されなかった。

JIS K 1571では、オオウズラタケおよびカワラタケによる処理試験体の質量減少率がともに3%以下の場合に、処理に使用した薬剤が木材防腐性能を持つと判定される¹⁾。今回の試験は、スギ心材を供試材料としたことと、薬剤を使用していないことがこの試験規格とは異なるが、この判定基準を参考にするならば、今回使用した

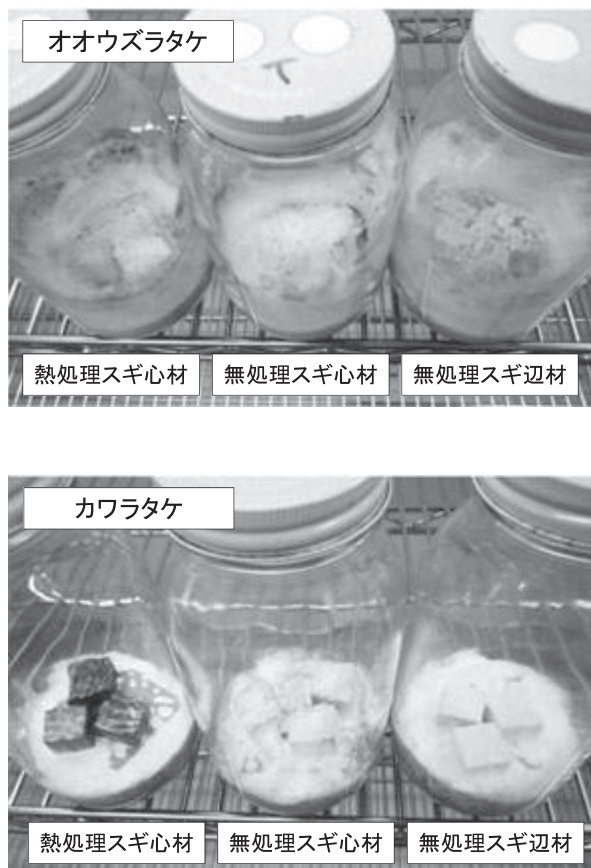


図3 抗菌操作終了時の試験体

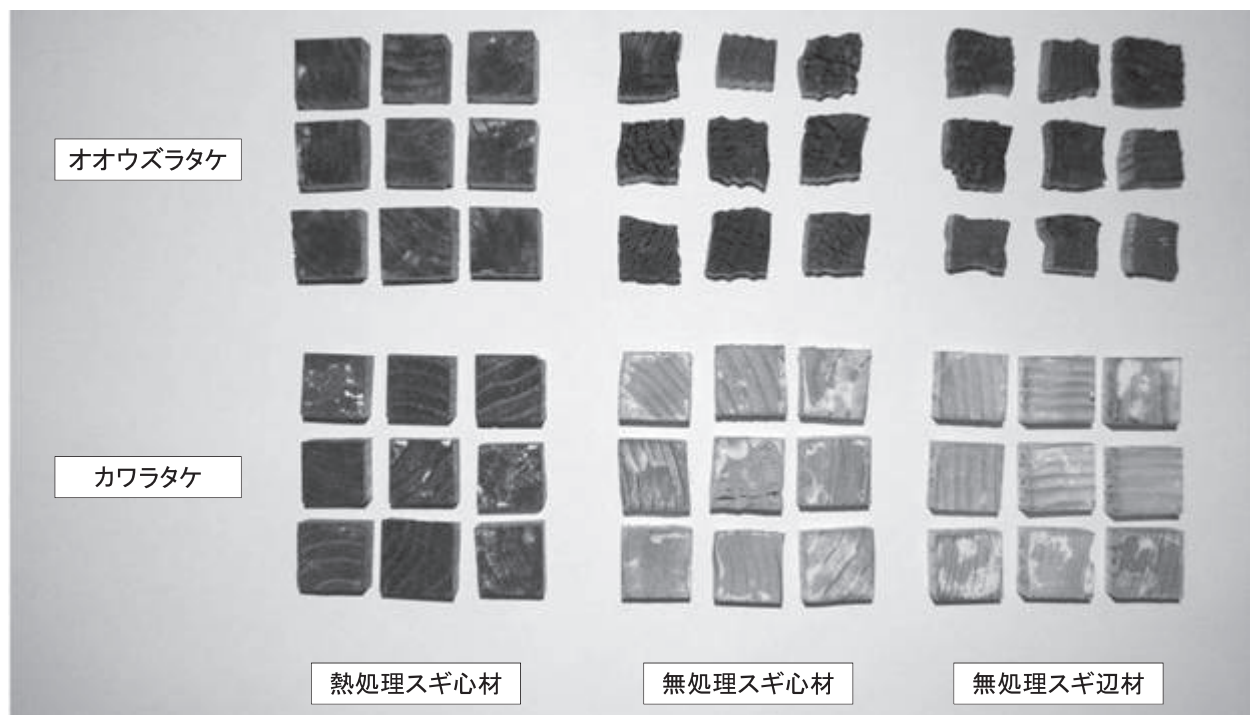


図4 抗菌操作後の試験体

熱処理木材は、高い耐朽性を有していると判断された。

3.2 金属腐食性

高温条件で3、6および12週間、木材試験体に打ち込まれた状態で暴露されたくぎの質量減少率を図6に、水濡れ条件で12および24週間暴露されたくぎの質量減少率を図7に示す。また、高温条件で6週間暴露された試験体におけるくぎの状態を図8に示す。CNくぎおよびZNくぎについては、暴露試験に供していない未使用の状態で、さび除去法Aの操作によりそれぞれ0.2%と5.8%の

質量減少が見られた。これは、さび除去法Aの操作により、くぎの表面やめっきの一部が溶解したためと考えられる。SFくぎでは、この操作による質量減少は0%であった。したがって、本報でくぎに対する腐食性を評価するにあたっては、以上の点に注意が必要である。

CNくぎの質量減少率は、高温条件の12週間までの暴露で、熱処理材が0.5~1.0%、無処理材が0.1~0.4%、水濡れ条件の24週間までの暴露で、熱処理材が2.5~2.7%、無処理材が1.7~1.9%となり、いずれも熱処理材が無処理材に比べて高くなった。また、水濡れ条件の暴露では、水面に近い位置にあったCNくぎほど、質量減少率が高くなる傾向があった。

SFくぎは、いずれの暴露においても、熱処理材、無処理材ともに、質量の変化が極めて少なかった。熱処理材に打ち込んだくぎの方が、質量減少率の平均値は高いが、測定誤差の範囲内であった。

ZNくぎの質量減少率は、いずれの条件においても5.2~6.1%となった。これは、さび除去法Aの操作によってめっきが溶解したためと考えられ、熱処理による腐食への影響を評価することはできなかった。一方、水濡れ条件において26週間暴露したZNくぎを、さび除去法Bでめっきのさびを除去した結果、質量減少率は熱処理材

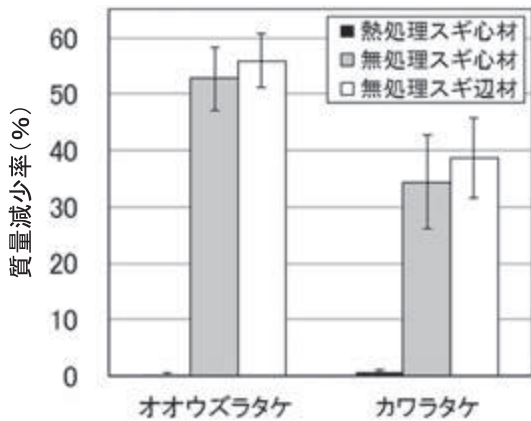


図5 抗菌操作による木材試験体の質量減少率
エラーバーは標準偏差を示す

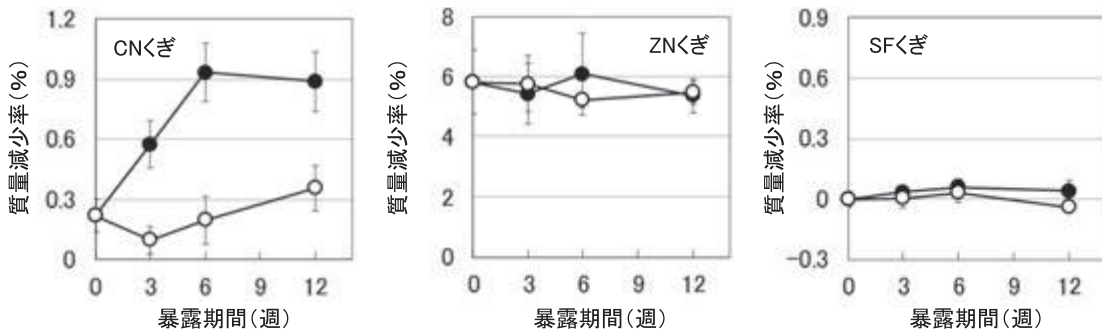


図6 高温条件で木材試験体に打ち込まれた状態で暴露された後、さび除去法Aの操作が行われたくぎの質量減少率
●：熱処理スギ心材、○：無処理スギ心材；エラーバーは標準偏差を示す

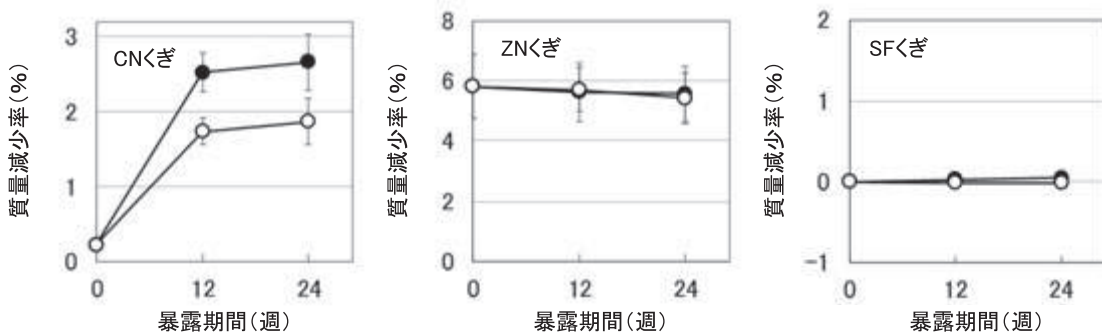


図7 水濡れ条件で木材試験体に打ち込まれた状態で暴露された後、さび除去法Aの操作が行われたくぎの質量減少率
●：熱処理スギ心材、○：無処理スギ心材；エラーバーは標準偏差を示す

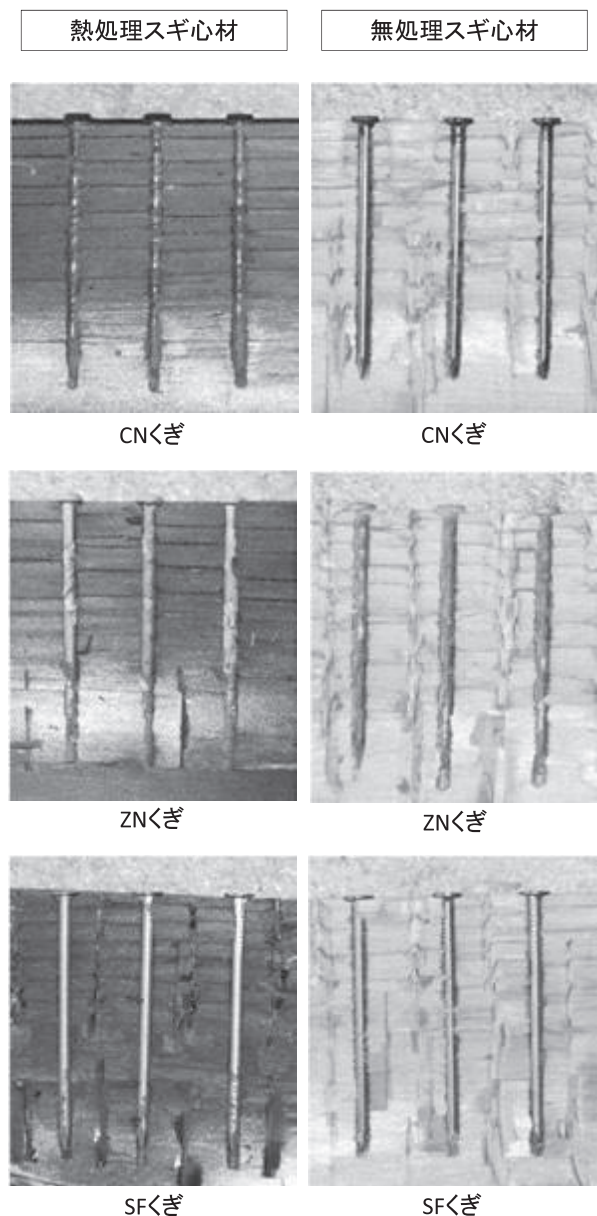


図8 高温条件で6週間、木材試験体に打ち込まれた状態で暴露されたくぎの状態

で0.4%、無処理材で0.3%であった。暴露試験に供していない未使用のZNくぎを用いて、さび除去法Bの操作を行うと0.1%の質量減少であり、この操作によるめっきの溶解はわずかであると言える。

水濡れ条件において26週間暴露したCNくぎおよびSFくぎについて、さび除去法Bの操作を行うと、CNくぎはさびがほとんど除去されず、腐食性を評価することはできなかった。SFくぎは、前述の結果と同様、熱処理材および無処理材のいずれにおいても、暴露前後での質量の変化が極めて少なかった。なお、暴露試験に供していない未使用のCNくぎおよびSFくぎを用いて、さび除去法Bの操作を行うと、質量減少はいずれも0%であった。

以上をまとめると、CNくぎを熱処理材に打ち込んだ場合、無処理材の場合よりも、腐食しやすいことが明らかになった。しかし、ZNくぎおよびSFくぎは、熱処理材、無処理材ともに腐食量がわずかであり、熱処理による腐食への影響は認められなかった。

3.3 金属の腐食への木材の含水率および温度の影響

暴露前および暴露終了時における木材試験体の推定含水率あるいは含水率（以下、含水率と記す。）を、暴露条件ごとに各暴露期間の値を平均して以下に示す。高温条件では、熱処理材は暴露前の含水率が3%、暴露終了時が4%であったのに対して、無処理材は暴露前、暴露終了時ともに11%であった。一方、水濡れ条件では、熱処理材は暴露前の含水率が4%、暴露終了時が75%であったのに対して、無処理材は暴露前が11%、暴露終了時が109%であった。

このように両暴露条件において、また、暴露前および暴露終了時のいずれにおいても、熱処理材は無処理材に比べて含水率が低かった。木材に打ち込まれた鉄くぎの腐食は、木材の含水率が高いほど進行するが⁸⁾、熱処理材は無処理材と比較すると含水率が低かったにもかかわらず、前述のようにCNくぎの腐食を進行させやすかったことから、熱処理材には鉄の腐食に影響を及ぼす水以外の要因があると考えられる。

また、高温条件では、熱処理材、無処理材ともに、暴露期間中の含水率は、それぞれ通常の気乾状態と大差はなく、温度が高いという暴露環境であったことがわかる。化学反応は温度に依存し、10℃上昇するごとに反応速度は2倍以上になるとされている⁹⁾。奈良の年平均気温は約15℃であることから¹⁰⁾、高温条件での暴露試験の結果は、気乾状態の木材に打ち込まれたくぎの腐食を、約20倍以上に促進して評価したものに相当すると考えられる。

3.4 金属の腐食への木材のpHの影響

長さが1mの板材の中央付近および端部付近におけるpHを表2に示す。熱処理材のpHは約5.3、無処理材のpHは約6.6となり、熱処理材は無処理材に比べてpHが低かった。この結果は、熱処理材が酸性を帯びているという既往の報告³⁾と同じ傾向である。また、熱処理材、無処理材ともに、中央付近と端部付近でpHの差は見られなかった。

表2 板材の中央付近および端部付近におけるpH

材料	中央付近	端部付近	平均
熱処理スギ心材	5.3	5.2	5.3
無処理スギ心材	6.6	6.7	6.6

ベイツ材はベイツ材と比較して、防錆処理を施した鋼板を腐食させやすい傾向が見られるという報告がある¹¹⁾。ベイツ材のpHは辺材で5.2、心材で4.8~4.85であるのに対して、ベイツ材のpHは辺材で4.5~4.76、心材で3.3~4.45とより低い¹²⁾。ベイツ材においてより腐食が進行したのは、pHが低いことが一因と考えられる。また、スギにおいて、高温乾燥材では天然乾燥材と比較して打ち込まれた鉄丸くぎN65の腐食の進行が速く、心材のpHは高温乾燥材で5.3~5.5、天然乾燥材で6.9であり、高温乾燥材の方が低いという報告がある¹³⁾。今回においても、熱処理材に打ち込んだCNくぎの腐食量が多かった要因の1つとして、熱処理による木材のpHの低下が考えられる。また、スギ心材において、窒素加圧雰囲気下で220℃の熱処理を行うことによるpHの低下は、高温乾燥によるpHの低下とほぼ同程度と言える。

まとめ

窒素加圧雰囲気下での220℃の熱処理により、スギ心材の板材は、耐朽性が高い材料に変化したことが明らかになった。しかし、同時に、無処理の木材よりも、接触する鉄が腐食しやすい状態になっていることも判明した。この理由として、熱処理に伴って、木材のpHが低下したことが一因と考えられた。今回測定されたpH 5.3という値は、たとえばベイツ材の無処理心材のpH (3.3~4.45) よりも高い値であり、一般に流通している他の木材と比べて特に酸性が強いわけではないが、接合具や接合金物を使用する際には、鉄単体のものを避け、溶融亜鉛めっき等の防錆処理を施したものやステンレス鋼等の腐食しにくい金属のものを選択することが望ましいと言える。

謝辞

金属腐食性試験の実施にあたり、元奈良県森林技術センター嘱託職員 辻勝美氏にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 日本工業規格JIS K 1571:2010「木材保存剤－性能基準及びその試験方法」。東京, (財)日本規格協会, 2010.
- 2) 原口隆英:“1・5・2 主要樹種の耐朽性”. 木材保存学. (社)日本木材保存協会編著. 初版, 大阪, 文教出版,

1982, 65-67.

- 3) 江間忠木材(株): エステックウッドパンフレット「S-TECH WOOD」.
- 4) 酒井温子, 岩本頼子, 伊藤貴文, 佐藤敬之: 窒素雰囲気下で熱処理された木材の耐朽性, 耐蟻性および吸湿性. 木材保存. 34 (2), 69-79 (2008)
- 5) 酒井温子, 佐藤敬之, 金沢吉昭: 窒素雰囲気下で熱処理された木材の野外耐久性. 木材保存. 38 (3), 111-116 (2012)
- 6) 日本工業規格JIS H 8502:1999「めっきの耐食性試験方法」. 東京, (財)日本規格協会, 1999.
- 7) 後藤輝男, 往西弘次: “25.1 木材pHの測定法”. 木材利用の化学: 付. 抽出成分・pH一覧表. 今村博之ほか編. 初版, 東京, 共立出版, 1983, 400-401.
- 8) 今村浩人, 木口実, 大黒昭夫: 木造家屋の外壁における釘の劣化からみた木材の劣化. 林業試験場研究報告. 345, 101-149 (1987)
- 9) Garrett, A. B.; Lippincott, W. T.; Verhoek, F. H.: “反応速度を決める因子”. ギャレット 化学 (下). 田丸謙二訳. 初版, 東京, 東京化学同人, 1971, 597-602.
- 10) 奈良地方気象台: 奈良県の気象 平成26年 (2014年) 年報 http://www.jma-net.go.jp/nara/kishou/pdf_files/nen2014.pdf
- 11) 石山央樹, 中島正夫, 森拓郎, 野田康信, 中島裕貴, 植本敬大: 保存処理木材に接する各種表面処理鋼板の暴露試験【その4】暴露試験3年経過報告. 2014年度日本建築学会大会 (近畿) 学術講演梗概集. 日本建築学会編著. 神戸, 2014-9, 日本建築学会, 2014, 395-396.
- 12) 後藤輝男, 往西弘次: “25.2 木材のpH”. 木材利用の化学: 付. 抽出成分・pH一覧表. 今村博之ほか編. 初版, 東京, 共立出版, 1983, 401-415.
- 13) 武田孝志: スギ高温乾燥材における接合金物のサビ. NPO木の建築. 23, 38-41 (2009)

(2015年4月23日 受理)